

На правах рукописи



Маслов Владислав Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЛЕТУЧИХ
ПИЛЬНЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ
МОДЕЛИРОВАНИЯ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ
ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ТРУБ**

05.02.09

Технологии и машины обработки давлением

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Чечулин Юрий Борисович

Официальные оппоненты:

Гузанов Борис Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВПО "Российский
государственный профессионально-
педагогический университет",
заведующий кафедрой сертификации,
метрологии и управления качеством в
машиностроении

Орлов Григорий Александрович,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВПО «Уральский
федеральный университет им. первого
Президента России Б. Н. Ельцина»,
профессор кафедры обработки металлов
давлением

Ведущая организация:

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения Уральского
отделения Российской академии наук

Защита состоится 20 сентября 2013 г. в 14-30 на заседании диссертационного совета Д 212.285.10 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. М-323.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Автореферат разослан 12 августа 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
д-р. техн. наук



Е.Ю. Раскатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Качественное и быстрое разделение трубы в линии стана для производства труб существенно влияет на производительность всей линии, которая снижается в случае необходимости введения дополнительных линий подрезки и мерной резки на участках трубоотделки.

С решением проблемы качества отрезаемых заготовок и увеличения производительности прокатных линий в первую очередь встает вопрос о применяемом для этого оборудовании. Если производительность линии критически высока (агрегаты с непрерывным станом) либо длина изготавливаемых изделий не позволяет производить операции разделения стационарно (трубоэлектросварочные станы с "бесконечными" трубами либо редуционные станы с большими коэффициентами вытяжки) для разделения труб используются так называемые летучие пильные установки (ЛПУ), инструмент которых движется плоскопараллельно со скоростью разрезаемой трубы, обеспечивая ее разделение в движении.

Однако, проблема разделения стальных труб и проката на мерные длины на ходу на прокатных производствах недостаточно освещена в научной и технической литературе. Мало изучена кинематика процесса поперечного разделения труб летучими пилами, обусловленная сложной геометрией инструмента и изделия. Не существует математической модели для описания изменения усилия разделения в процессе, динамического поведения приводов летучих пильных установок. Конструкции пильных установок имеют ряд существенных недостатков приводящих к снижению качества резания и надежности работы комплексов оборудования ЛПУ, что в свою очередь приводит к снижению производительности трубопрокатных и трубоэлектросварочных агрегатов.

На основании вышеизложенного, исследование процесса разделения труб на летучих пильных установках с целью совершенствования их конструкций является актуальным.

Целью работы является совершенствование конструкций летучих пильных установок планетарного и кареточного типа на основе моделирования кинематики и динамики процессов разделения труб, повышение их работоспособности, снижение аварийности работы и повышение качества получаемых изделий. При этом были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка математической модели кинематики и определения энергосиловых параметров процесса высокоскоростного разделения движущихся труб на мерные отрезки, с использованием методов, основанных на анализе пластического течения металла в области очага деформации, учитывая специфику кинематики пильных установок, геометрическую форму инструмента и изделия, температурные характеристики, .

2. Разработка математической модели динамики привода летучей пильной установки, на основе матричного метода построения моделей

механических систем, с учетом влияния характеристик электродвигателя пильной установки и ременной передачи.

3. Разработка пакетов прикладных программ для автоматизированного расчета технологических усилий и динамических характеристик привода летучих пильных установок в процессе разделения труб.

4. Разработка рекомендаций по модернизации оборудования пильных установок, обеспечивающих повышение работоспособности, снижение аварийности работы и повышения качества разделяемых труб.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые получены следующие результаты:

- разработана математическая модель высокоскоростного разделения движущегося потока труб на мерные отрезки для определения изменяющейся во времени доли металла, удаляемой каждым зубом пильного диска, в зависимости от кинематики, траектории движения его центра, от размерных параметров профиля зуба и сечения разделяемой заготовки, а также для вычисления суммарного слоя металла, удаляемого изменяющимся количеством зубьев, находящихся одновременно в контакте с заготовкой;
- на основании метода характеристик с использованием линий скольжения получены границы очагов деформации в областях передней и задней граней зубьев режущего диска в зависимости от геометрических параметров профиля зубьев, позволяющие определить характеристики напряженного состояния деформируемого металла и вероятные причины образования дефектов в виде тонкостенного «облоя», обусловленные состоянием пластической области в районе передней и задней рабочих граней зуба;
- на основании кинематики процесса и положений теории пластичности разработаны математические модели определения энергосиловых характеристик быстроходных летучих пильных установок (ЛПУ) кареточного и планетарного типа при разделении на мерные отрезки непрерывно движущейся трубной заготовки, реализованные в виде алгоритмов, программ для ЭВМ и инженерных формул; применение методов, основанных на анализе пластического течения металла в области очага деформации, позволили определить значения силового воздействия на инструмент с учетом высокой скорости деформирования, температурных условий процесса, геометрических параметров профиля зубьев, особенностей нестационарного изменения подачи на зуб и количества зубьев одновременно находящихся в контакте с заготовкой;
- полученные значения технологических нагрузок и анализ схем нагружения устройств позиционирования заготовки, разделяемой на мерные участки в линии ЛПУ планетарного типа, послужили основанием для разработки новых устройств, исключающих аварийные ситуации при удалении немерных отрезков;
- на основании полученных значений технологических нагрузок разработана обобщенная динамическая модель приводного механизма пильного диска, позволившая установить закономерности изменения в нем динамических

нагрузок с учетом особенности и ограничения тяговой способности применяемой ременной передачи; решение уравнений равновесия для конкретных параметров динамической системы и разработанные номограммы позволили в зависимости от марко-типоразмеров разделяемых труб определить и подтвердить результатами натурных измерений рациональные параметры настройки и усилия предварительного натяжения ремня.

Практическая ценность:

- На базе определения силовых и кинематических характеристик, полученных с использованием предложенных математических моделей, для ЛПУ планетарного типа (ЛПУ - RHS1000), установленной в технологической линии редукирующего стана ТПА 30-102, разработан и защищен патентами РФ комплекс технических предложений, направленных на повышение работоспособности и безотказности транспортной части оборудования и снижение расходного коэффициента при прокатке труб.

- для ЛПУ кареточного типа трубосварочного агрегата (ТЭСА 102–377) выполнена модернизация приводного механизма. На основании анализа полученной расчетной модели для определения энергосиловых показателей разработан номографический метод расчета и оборудование контроля натяжения ременной передачи, позволившие многократно увеличить безотказность работы пильной установки.

Методы исследования:

1. Моделирование взаимного движения инструмента и отрезаемой трубы на основании их кинематики и геометрии.

2. Моделирование процесса разделения труб с использованием методов пластического течения металла в очаге деформации.

3. Моделирование динамики привода пильных установок с использованием матричного метода построения моделей динамических систем.

4. Экспериментальное исследование действующих летучих пильных установок. Запись показаний значения тока на одной из фаз электродвигателя привода установки и значений давления в штоковой полости гидроцилиндра подачи.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математическая модель высокоскоростного разделения движущегося потока труб на мерные отрезки для определения изменяющейся во времени доли металла, удаляемой каждым зубом пильного диска, в зависимости от кинематики, траектории движения его центра, от размерных параметров профиля зуба и сечения разделяемой заготовки, а также расчетные зависимости для вычисления суммарного слоя металла, удаляемого изменяющимся количеством зубьев, находящихся одновременно в контакте с заготовкой

2. Математические модели определения энергосиловых характеристик быстроходных летучих пильных установок (ЛПУ) кареточного и

планетарного типа при разделении на мерные отрезки непрерывно движущейся трубной заготовки, реализованные в виде алгоритмов, программ для ЭВМ и инженерных формул, разработанные на основании кинематики процесса и положений теории пластичности.

3. Обобщенная динамическая модель приводного механизма пильного диска, разработанная на основании полученных значений технологических нагрузок, позволяющая установить закономерности изменения в нем динамических нагрузок с учетом особенности и ограничения тяговой способности применяемой ременной передачи

4. Рекомендации по совершенствованию конструкций летучих пильных установок для повышения работоспособности транспортных линий ЛПУ планетарного типа и приводных механизмов ЛПУ кареточного типа.

Апробация работы. Основные положения работы и отдельные разделы докладывались на XVII конференции молодых ученых (Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2009), XVIII конференции молодых ученых (Екатеринбург, УрФУ, 2010), международной научно-технической конференции "Трубы 2010" (Челябинск, РосНИТИ, 2010), Шестой международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа по обработке металлов давлением имени профессора А. Ф. Головина» (Екатеринбург, УрФУ, 2012), IX Конгрессе прокатчиков (Череповец, «Северсталь», 2013), Десятой международной конференции «Современные металлические материалы и технологии» (Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2013).

Публикации. Результаты работы представлены в 9 публикациях, в числе которых 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 151 странице, содержит 5 таблиц, 87 рисунков, 3 приложения, библиографический список из 75 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулированы её цели и задачи.

В первой главе рассмотрены различные типы агрегатов для порезки труб, особое внимание уделено агрегатом для порезки труб на ходу, а также разновидности летучих пильных установок с описанием принципов работы устройств, входящих в их комплекс, с выявлением возможностей по повышению работоспособности основных узлов на основании анализа их конструкций, быстродействия, принципа работы. Установлено, что оборудование комплекса летучих пильных установок, особенно планетарного типа, требует серьезных модернизаций для повышения работоспособности и снижения аварийности. Для совершенствования конструкций летучих пильных установок необходимо знать технологические усилия, действующие

на инструмент, а также кинематику работы пильных установок и вспомогательного оборудования (рольганги, сталкиватели и т.д.), геометрию взаимного перемещения разрезаемой заготовки и пильного диска, быстродействие устройств для удаления обреза и принципы их работы.

Выполнен обзор работ по определению усилий, действующих на инструмент при разделении проката. Рассмотрены работы А. И. Целикова, Л. Д. Соколова, С. А. Серегина по определению технологических усилий пильных установок для резки проката; подходы, применяемые в технологии машиностроения для определения усилий резания, в т. ч. подход, основанный на применении теории пластического разрушения А. Л. Воронцова, Н. М. Султан-Заде, А. Ю. Албагачиева. Каждый подход рассмотрен критически с позиций определения технологических усилий при разделении труб в движении с учетом: геометрии инструмента и изделия (труба), скоростей взаимного перемещения и кинематики движения зубьев и разделяемой трубы, скоростей резания, температур, при которых осуществляется процесс. Показано, что наиболее применимым подходом для определения усилий, является подход основанный на теории пластического разрушения. Однако в рассмотренных работах не уделено внимания высокоскоростной порезке изделий сложной формы, с учетом взаимных перемещений изделия и инструмента. Следовательно, для определения технологических усилий и энергосиловых параметров летучих пильных установок необходимо прежде всего математически описать кинематику процесса и геометрию движения дисков пил и разрезаемых труб, а также разработать теоретические положения расчета энергосиловых параметров с учетом особенностей рассматриваемого процесса.

Выполнен обзор основных подходов к решению задач динамического поведения механических систем с учетом влияния характеристик электродвигателей. Показана необходимость решения динамической задачи с учетом неголономных связей, характерных для приводных устройств высокоскоростной порезки труб.

Во второй главе описано определение основных параметров влияющих на технологические усилия и энергосиловые параметры процесса разделения труб на мерные длины в движении.

Выделены основные особенности процесса разделения труб на ходу

1. Ввиду сложной геометрии разрезаемого изделия различное количество зубьев вступают в работу в разные промежутки времени, максимальное количество при прохождении стенок, и минимальное при прохождении отверстия трубы.
2. Вследствии необходимости синхронизации движения диска и поступательного движения трубы в установках планетарного типа скорость подачи становится величиной переменной и падает практически в два раза уже к середине процесса разрезания.
3. Высокие окружные скорости инструмента (до 100 м/с) при относительно небольших скоростях подачи приводят к крайне небольшим

глубинам резания, соизмеримым с упругими деформациями системы «инструмент – обрабатываемый металл», что требует рассмотрения области деформации в упруго пластической постановке.

4. На каждый зуб действуют различные усилия резания, в связи с поступательным движением подачи диска. При расчете энергосиловых параметров необходимо использовать суммирование усредненных значений усилия.

В первой части главы описывается кинематика работы летучих пильных установок кареточного типа (Рисунок 1).

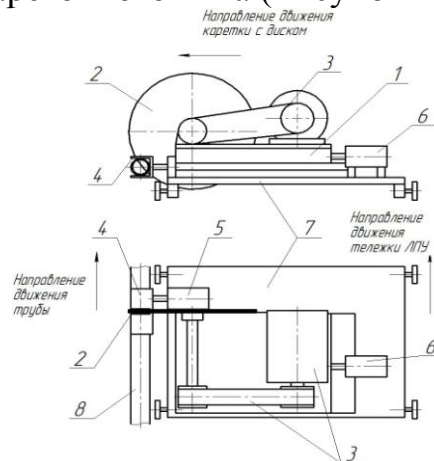


Рисунок 1 – ЛПУ кареточного типа

Особенностью работы данного типа устройств является то, что скорость подачи V_{Π} является величиной практически постоянной, и задается на основании рациональных значений секундного объема срезаемого слоя - q , который, в свою очередь, определяет полное время резания $t_{pф}$.

$$V_{\Pi} = \frac{L_p}{t_{p.ф.}}, \quad (1)$$

где L_p – длина пути проходимого диском в процессе резания, определяемая на основании расчетной схемы (Рисунок 2).

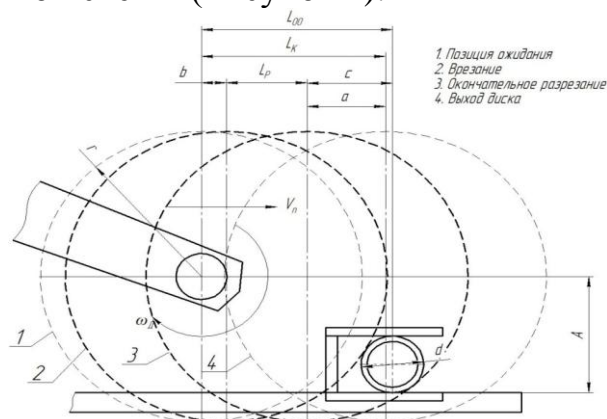


Рисунок 2 – Расчетная схема процесса резания ЛПУ кареточного типа

Для описания кинематики непосредственно процесса резания, составлена расчетная программа с помощью средств программирования "Mathcad".

Перемещение подачи в направлении оси трубы за время резания t пильного диска определяется выражением:

$$h(t) = V_{\Pi} \cdot t \quad (2)$$

Длина прямой соединяющей центры диска и трубы:

$$gip(t) = \sqrt{\left[\sqrt{\left(\frac{d}{2} + r\right)^2 - H^2} - h(t) \right]^2 + H^2} \quad (3)$$

Здесь H – разница по высоте оси трубы и диска трубы; d – диаметр трубы; r – радиус диска пилы.

$$S(t) = gip(t) - gip(t - dt) \quad (4)$$

По найденным значениям разности углов между точками входа и выхода зуба на поверхность трубы $\varphi(t)$ и в отверстии трубы $\varphi_{OTB}(t)$ и угловому шагу θ определяется количество зубьев $n(t)$ находящихся одновременно в зоне контакта с отрезаемой заготовкой и суммарная величина снимаемого слоя

$$c(t) = n(t) \cdot S(t) \quad (5)$$

На основании этих зависимостей получены графики изменения толщины снимаемого слоя.



Рисунок 3 – График зависимости суммарной толщины снимаемого слоя от перемещения диска для трубы $\varnothing 273 \times 8$

Во второй части главы описывается кинематика и размерные характеристики резания на ЛПУ планетарного типа (Рисунок 4).

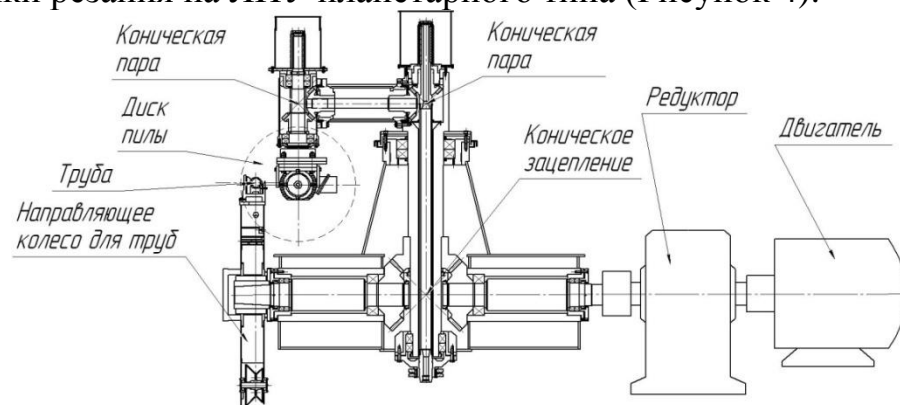


Рисунок 4 – ЛПУ планетарного типа

Для описания кинематики непосредственно процесса резания, также составлена расчетная программа с помощью средств программирования

приложения "Mathcad". Расчетная схема, принятая для описания процесса резания на ЛПУ "Kocks RHS 1000-1", представлена на рисунке 5.

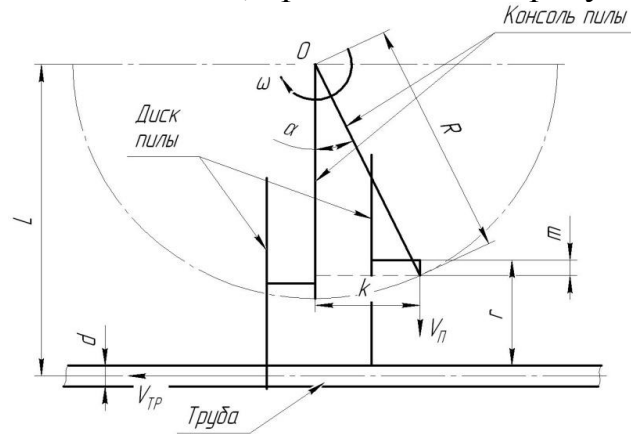


Рисунок 5 – Расчетная кинематическая схема резания на ЛПУ планетарного типа

В рассматриваемом случае максимальное за цикл порезки перемещение заготовки обозначено k :

$$k = \sqrt{R^2 - \left(L - \frac{d}{2} - r + m\right)^2}, \quad (6)$$

где L – межосевое расстояние между колонной пилы и трубой; R – длина консоли пилы; d – наружный диаметр трубы; r – радиус пильного диска; m – начальная настройка диска, обеспечивающая его выход за пределы разрезаемой трубы на 10 мм, после окончания резания.

Скорость подачи пильного диска можно записать как:

$$V_{II}(t) = V_{TP} \cdot \operatorname{tg} \left[\arcsin \left(\frac{k - V_{TP} \cdot t}{R} \right) \right] \quad (7)$$

Перемещение подачи пильного диска определяется выражением:

$$h(t) = \int_0^t V_{TP} \cdot \operatorname{tg} \left[\arcsin \left(\frac{k - V_{TP} \cdot t}{R} \right) \right] dt \quad (8)$$

Далее расчет суммарной толщины срезаемого слоя аналогичен расчету для ЛПУ кареточного типа. На основании полученных зависимостей построены графики изменения толщины суммарного снимаемого слоя в процессе (Рисунок 6).

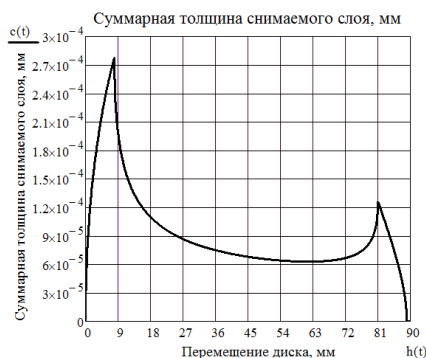


Рисунок 6 –Изменение суммарной толщины снимаемого слоя в функции от перемещения диска для трубы ø89x8

Выводы.

При заданных значениях скорости движения разрезаемой трубы и длины хода тележки ЛПУ максимальная скорость подачи режущего инструмента ограничена износостойкостью режущих кромок, а минимальная – заданной длиной мерных отрезков.

Установлено, что при постоянной скорости подачи средняя подача на зуб и глубина их внедрения в разрезаемый металл за период разделения трубной заготовки монотонно снижаются примерно на 1/3 от начала к концу цикла резания. Так при мерной порезке труб $\Phi 275 \times 8$ средняя подача на зуб изменяется от 4,5 мкм до 3,15 мкм.

Общей особенностью изменяющейся во времени величины мгновенного суммарного объема удаляемого металла, определяемого длиной дуги резания и средней подачей на зуб является наличие двух кратковременных пиковых значений: при подходе периферии пильного диска к внутренней полости трубы и при выходе его за пределы внутренней полости. При суммарной длительности пиковых нагрузок, составляющей долю от длительности цикла порезки, близкую к отношению удвоенной толщины стенки к наружному диаметру трубы, их абсолютная величина многократно (до 5 раз) превышает соответствующие значения, полученные при прохождении пильным диском полой части разрезаемого изделия.

Основным отличием процесса разделения труб на ЛПУ планетарного типа от их порезки на ЛПУ кареточного типа является непостоянство скорости подачи пильного диска при заданной постоянной скорости движения разрезаемой заготовки. В течение единичного цикла разделения труб скорость подачи снижается практически по линейному закону от максимального значения, соответствующего скорости движения заготовки до нуля. Моделирование процесса в соответствии с полученными зависимостями показывает значительное снижение глубины срезаемого слоя к концу процесса. Так при разделении труб на выходе из редукционного стана отношение максимума и минимума толщины срезаемого слоя составляет на малых типоразмерах 2,1, а на больших - 3,8.

В третьей главе определяются основные энергосиловые параметры процесса разделения движущихся труб на ЛПУ и решается задача определения динамических характеристик привода этих установок.

В первой части главы получены зависимости окружного усилия летучей пильной установкой кареточного типа на основании выше представленных характеристик процесса (подача, скорость резания) с использованием «новой теории резания», представленной в работах А. Л. Воронцова, Н. М. Султан-Заде, А. Ю. Албагачиева. Учитывая малую глубину внедрения инструмента в металл заготовки по сравнению с длиной режущей кромки, дальнейшее решение представлено для случая плоского деформированного состояния. В полученных зависимостях учтены основные особенности высокоскоростного процесса резания непрерывно движущихся труб металлургическими пилами такие как: переменная подача на зуб,

переменная скорость подачи инструмента, изменяющееся количество зубьев, одновременно находящихся на дуге резания, высокие скорости резания, высокие температуры при резке труб в линиях прокатных станков, варианты геометрии профилей зубьев, нестационарная глубина внедрения режущей кромки.

С учетом перечисленных особенностей рассматриваемого процесса быстроходного разделения трубной заготовки пильным диском функциональная зависимость для определения усилия F , воспринимаемого зубьями пильного диска, одновременно находящимися на дуге резания, от времени резания t имеет следующий вид

$$F(t) = \left[\left(1 + \mu \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_c} \right) \cdot \cos \gamma + \frac{k_c}{4 \cdot u \cdot \cos \gamma} + \mu \cdot \sin \gamma + \frac{\mu \cdot l_3(t)}{u \cdot S(t)} \right] \times \quad (9)$$

$$\times \beta \cdot u \cdot \sigma_{st} \cdot S(t) \cdot B \cdot n(t) + F_{CD}(t),$$

где $S(t)$ – зависимость толщины срезаемого слоя от времени; μ – коэффициент трения, принимаемый 0,5 при резании стали; γ – передний угол зуба; β – коэффициент Луде; B – ширина диска пилы; $n(t)$ – количество зубьев диска, одновременно находящихся в работе; h_2 – толщина стружки, h_1 – толщина срезаемого слоя ($h_1 = S$);

$$k_c \text{ – коэффициент утолщения стружки } k_c = \frac{h_2}{h_1}, \quad (10)$$

u – коэффициент, зависящий от переднего угла;

$$\begin{cases} u = 1 & \text{при } \gamma \geq 0 \\ u = 1 - \sin \gamma & \text{при } \gamma < 0 \end{cases}$$

σ_{st} – среднее напряжение текучести для разрезаемого материала при заданной температуре

$$\sigma_{st} = \sigma_s \cdot \left(1 - \frac{t^\circ}{3000} \right), \quad (11)$$

σ_s – напряжение текучести, определяемое с учетом упрочнения, на основании рассчитанной средней накопленной степени деформации e_i

$$e_i = 1,155 \cdot \left(1 + e^{-\cos \gamma} \right) \cdot \cos \gamma, \quad (12)$$

F_{CD} – усилие действующее на боковые поверхности диска

$$F_{CD}(t) = 0,5 \cdot \beta \cdot \sigma_s \cdot s_{cd}(t), \quad (13)$$

где s_{cd} – площадь боковой поверхности сдвига при резании

$$s_{cd}(t) = \frac{S(t) \cdot h_2(t)}{\cos \gamma} \quad (14)$$

Во второй части главы описаны основные особенности расчета энергосиловых параметров для различных типов установок.

Как показано в предыдущем разделе, основной особенностью разделения пильным диском профильных заготовок является переменная величина срезаемого слоя, зависящая от кинематического закона движения

(подачи) пильного диска, от геометрических характеристик формы сечения, от скорости вращения и размерных характеристик инструмента.

Вторую особенность процесса определения нагрузок на инструмент представляют температурные условия в зоне взаимодействия режущих зубьев с металлом заготовки. Значения напряжений текучести σ_{st} с учетом процессов упрочнения при холодной деформации и разупрочнения при разделении горячего проката существенно зависят от температур в зоне резания.

Рассмотрение очага деформации в области взаимодействия зубьев пильного диска с металлом заготовки требует учета геометрических особенностей профилирования зубьев. В производственной практике наиболее широкое распространение получили два профиля зубьев: с положительным передним углом γ (так называемый «волчий зуб», Рисунок 7) и с отрицательным углом γ (зуб треугольного профиля, Рисунок 8). Однако в технической литературе нет достаточных сведений о рациональном выборе этого параметра.

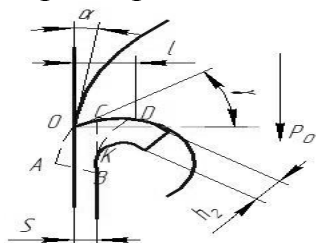


Рисунок 7 – Схема резания для формы «волчий зуб»

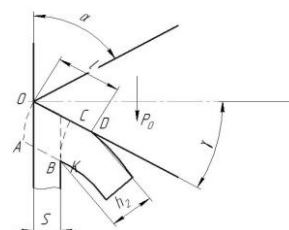


Рисунок 8 – Схема резания треугольной формы

Как видно, основными отличиями представленных схем резания являются:

1. Наличие («волчий зуб») либо отсутствие (треугольный профиль зуба) контакта задней поверхности зуба с разрезаемой поверхностью, а, следовательно, наличие либо отсутствие дополнительных сил трения на задней поверхности.

2. Передний угол γ положителен в случае «волчьего зуба» и отрицателен в случае треугольного, это оказывает влияние на коэффициент u и на толщину стружки. Однако, при высокоскоростном резании (100 м/с), имеющем место на металлургических пилах, влияние углов на утолщение стружки снижается, и коэффициент утолщения становится минимальным.

На рисунке 9 представлен результат расчета сил резания для ЛПУ кареточного типа, при разделении прямошовных сварных труб с использованием пильных дисков с профилем зубьев типа «волчий зуб». В качестве примера рассмотрен вариант разделения холодной сварной прямошовной трубной заготовки с размерами ($\phi 325 \times 6$), для которой выполнялось экспериментальное натурное определение усилий резания, подтвердившее справедливость и достоверность применения представленных расчетных зависимостей.

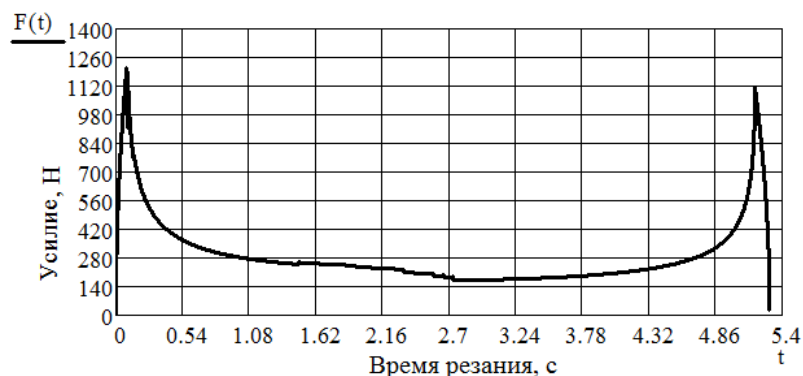


Рисунок 9 Зависимость окружного усилия от времени для ЛПУ кареточного типа (труба $\varnothing 325 \times 6$)

Пиковые значения технологической силы в начале и конце резания существенно превышают значения квазиустановившегося процесса (в рассматриваемом маршруте в 5 раз). Нестационарный закон изменения технологических нагрузок определяет ресурс инструмента по условиям износостойкости и трещиностойкости, а также кинематику и динамические нагрузки его приводного устройства.

Анализ напряженно-деформированного состояния металла заготовки в области очага деформации, прилегающего к задней грани зуба позволяет в дальнейшем учесть влияние заднего угла α на негативный процесс образования облоя в виде тонкостенной сливной стружки, препятствующей выполнению операции чистовой обработки торцов готовых труб. При внедрении зуба в поверхностном слое трубного сечения в области задней поверхности зуба возникают сжимающие напряжения σ_h на участке длиной l_3 .

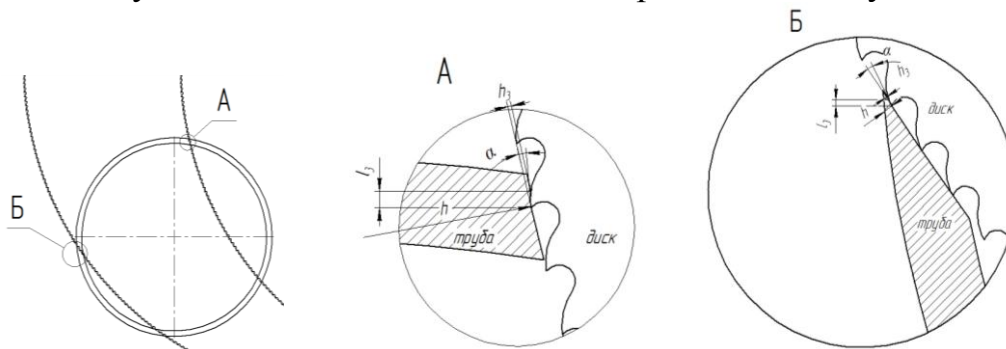


Рисунок 10 – Подъем упругой зоны в начале (А) и конце (Б) процесса

В первой половине резания упруго деформированный контактный участок задней поверхности зуба длиной l_3 определяется высокой жесткостью неразрезанной кольцевой части поперечного сечения высотой h (Рисунок 10А). В этом случае к моменту внедрения в металл заготовки последующего зуба происходит восстановление деформированного размера h на величину h_3 без ухудшения качества наружной поверхности разрезаемого изделия. После перемещения диска подающим механизмом на половину сечения трубы высота опорного слоя h резко уменьшается до значения, соизмеримого с глубиной подачи на зуб (Рисунок 10Б). В результате возникающих напряжений, тонкостенный консольный участок отделяется от поверхности трубной заготовки в виде тонкостенной сливной стружки и сохраняется до конечного момента отделения от нее мерного участка.

Образование облоя на горячекатаных трубах, происходит по другому механизму, вероятно связанному с пластическим разрушением металла под действием трения зубьев о торцевую поверхность при высокой температуре, о чем свидетельствует иная форма заусенца в виде тонкой мембраны или язычков в конце следа резания в районе отверстия.

На Рисунок 11 представлено численное решение задачи определения окружного усилия резания для варианта разделения горячего трубного проката на выходе из редукционного стана на ЛПУ планетарного типа с использованием пильных дисков с треугольной формой зуба.

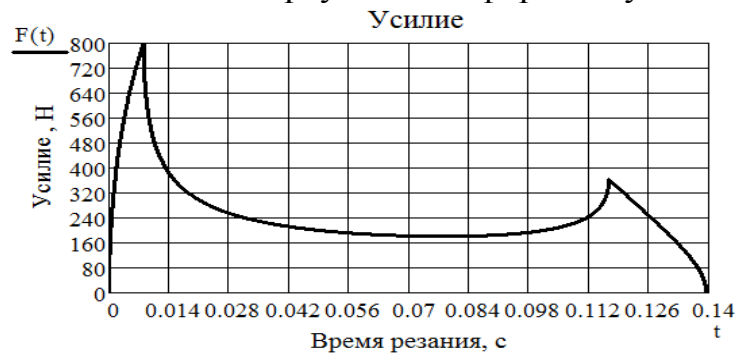


Рисунок 11 – Графическая зависимость окружного усилия от времени для ЛПУ планетарного типа (труба $\varnothing 89 \times 8$)

В третьей части главы дана оценка динамического поведения системы привода пильного диска с составлением алгоритмической программы с помощью средств программирования языка Python на основании матричного метода построения динамических моделей.

Кинематическая схема приводного механизма и динамическая схема замещения представлены на рисунке 12

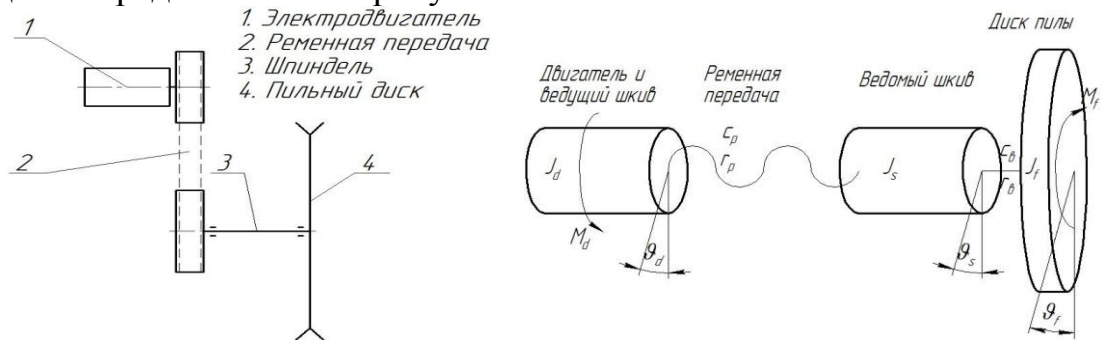


Рисунок 12 – Кинематическая и динамическая схема пильной установки

Для описания движения и кинетической энергии выбраны обобщенные координаты: ϑ_d – ротора двигателя, ϑ_s – ведомого шкива ременной передачи, ϑ_f – диска пилы.

Линеаризированное уравнение движения системы имеет вид

$$A\ddot{\vartheta} + B\dot{\vartheta} + C\vartheta + D = 0, \quad (15)$$

где A – матрица моментов инерции; B – матрица приведенных коэффициентов диссипации, приведенных к углу поворота диска; C – матрица коэффициентов жесткости, приведенных к углу поворота диска; D – вектор внешних сил, приведенных к углу поворота диска.

Полученная программа позволила установить динамические характеристики процесса разделения труб на летучей пильной установке кареточного типа ТЭСА 102-377. Влияние ременной передачи рассмотрено, как задача о действии вибрации на систему с трением. В общем случае при работе на незначительных нагрузках (либо без нагрузки) система находится в состоянии равновесия, а при превышении значения вибрационной силы происходит частичное пробуксовывание ременной передачи с повышенными вибрациями, которые отражены на пиках графика волнистыми линиями. Благодаря большим коэффициентам рассеивания ременной передачи система быстро возвращается к новому состоянию равновесия. В результате расчетов получены графические зависимости изменения крутящего момента двигателя в процессе резания (Рисунок 13)



Рисунок 13 – Графические зависимости изменения крутящего момента (толстая линия) и усилия разделения (тонкая линия) в процессе разделения труб $\varnothing 325 \times 6$

Изменение крутящего момента в данном случае является отображением изменения тока на двигателе.

Кроме того получены графические зависимости изменения скорости и напряжения на двигателе в процессе резания (Рисунок 14), по которым были скорректированы расчеты усилий резания.

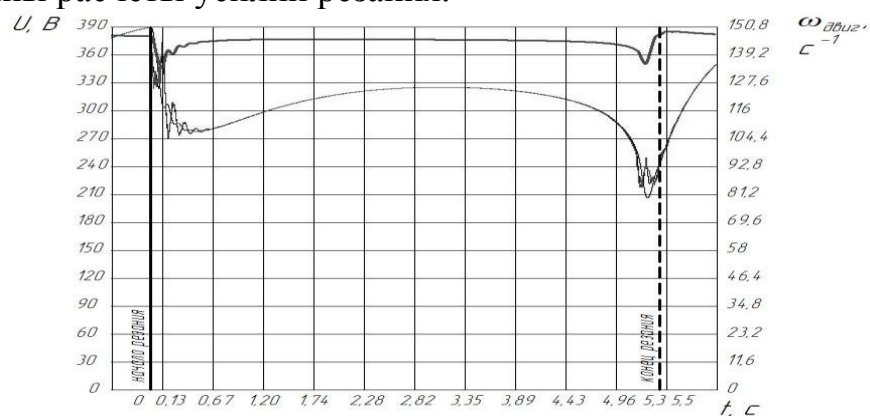


Рисунок 14 – Графическая зависимость изменения напряжения на двигателе (толстая линия) и скорости вращения ротора (тонкая линия) в процессе разделения труб $\varnothing 325 \times 6$

Полученная расчетная программа позволила сравнить теоретические расчеты технологических усилий с экспериментальными данными, что было

невозможно без учета динамического поведения системы, влияния ременной передачи и характеристик двигателя.

В четвертой части 3-ей главы описываются проведенные экспериментальные исследования усилий и крутящих моментов в процессе разделения труб на ЛПУ кареточного типа (ТЭСА 102-377). В процессе измерений регистрировали ток двигателя одной из фаз, определяющий значения динамических нагрузок в линии привода пильного диска, и давление в штоковой полости гидроцилиндра подачи диска, определяющие изменение усилий воспринимаемых инструментом в процессе разделения заготовки. Практические замеры выполнялись в широком диапазоне геометрических размеров разрезаемых труб. Пример результатов измерений представлена на Рисунок 15.

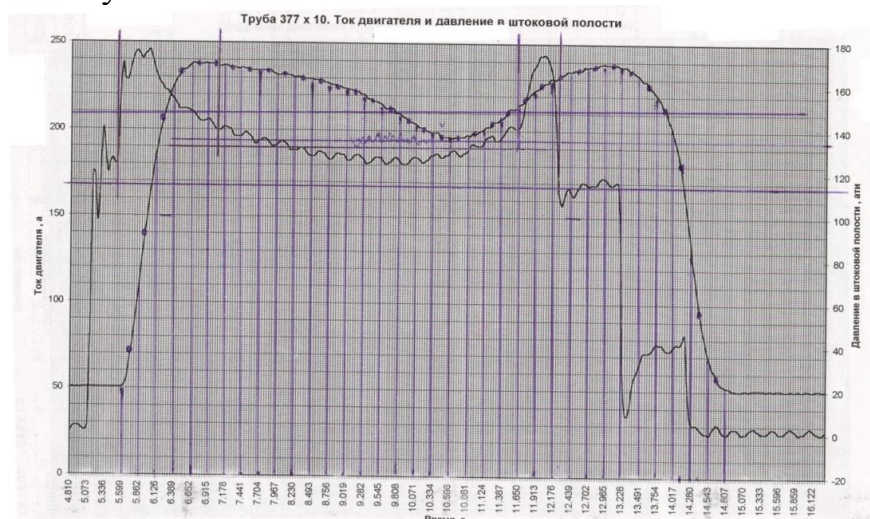


Рисунок 15 – Результаты измерения тока двигателя и давления в штоковой полости, труба 377x10

Здесь верхняя осциллограмма и правая шкала значений соответствуют регистрации давлений в гидравлическом цилиндре подачи каретки пильного диска. График давления в штоковой полости является отображением горизонтальной составляющей усилия резания. Изменение значений тока двигателя привода пильного диска, зарегистрированных в ходе практических измерений, представлены осциллограммами, распространяющимися на всю высоту (Рисунок15), и левой шкалой значений. В ходе динамических расчетов предыдущего раздела и результатов практического наблюдения установлено незначительное изменение электрического напряжения, что позволяет по значениям токовых показателей определить изменение значений крутящих моментов на валу двигателя. Результаты сравнения практических и расчетных значений показали практическое их совпадение с отклонениями, не превышающими 5–10% для всей группы измерений.

Выводы. С использованием методов теории пластичности и пластического течения металла разработана математическая модель и алгоритм для определения напряженно-деформированного состояния металла заготовки при быстроходной его порезке пильным диском с учетом геометрии профиля зуба, механических характеристик разрезаемого изделия,

температурных условий деформации и скорости подачи. Показаны вероятные причины образования дефектов в виде тонкостенного облоя, обусловленные состоянием пластической области в районе передней и задней рабочих граней зуба.

Установлена зависимость для закона изменения и пиковых значений суммарных сил резания от геометрических параметров сечения разрезаемой трубы, от скорости вращения пильного диска, среднего напряжения текучести и температуры разрезаемого материала (упрочнение или разупрочнение), от закона подачи режущего инструмента и геометрических характеристик его зуба.

На основании полученных значений технологических нагрузок составлена обобщенная динамическая модель замещения приводного механизма пильного диска, позволившая установить закономерности изменения динамических нагрузок, воспринимаемых валом двигателя.

Выполнен большой объем экспериментальных натурных измерений энергосиловых показателей на ЛПУ кареточного типа в технологической линии трубоэлектросварочного стана для производства прямошовных труб диаметром до 426 мм. Сравнения энергетических балансов теоретического расчета и экспериментальных данных показали высокую точность характеристик, полученных расчетным путем.

В четвертой главе описываются результаты использования полученных сведений об энергосиловых характеристиках нагружения механизмов ЛПУ, положенные в основу предложений о модернизации, действующего оборудования с целью повышения работоспособности пильных установок.

В первой части главы речь идет о модернизации ЛПУ RHS1000-1 планетарного типа фирмы "FRIEDRICH KOCKS GmbH & Co KG", установленной в линии ТПА 30–102 Первоуральского новотрубного завода. В процессе эксплуатации первоначально установленного оборудования были выявлены недостатки его работы. Целью предложенных мероприятий по модернизации ЛПУ RHS1000-1 является модернизация всех названных устройств, направленная на выполнение задач надежной порезки при всех режимах работы.

Наиболее серьезные аварийные ситуации возникали при отрезке коротких утолщенных участков от переднего и заднего концов заготовки, непрерывно выходящей из редуционного стана.. Причиной отказов послужила неуправляемая баллистика движения отрезаемых участков, их случайное попадание в подвижные элементы конструкции, вызывающие последующие разрушения деталей установки. Этому способствовало одностороннее, консольное опирание отрезаемых участков на вставные колодки направляющего колеса. Существующая схема позиционирования трубы во время порезки представлена ниже на рисунке 16.

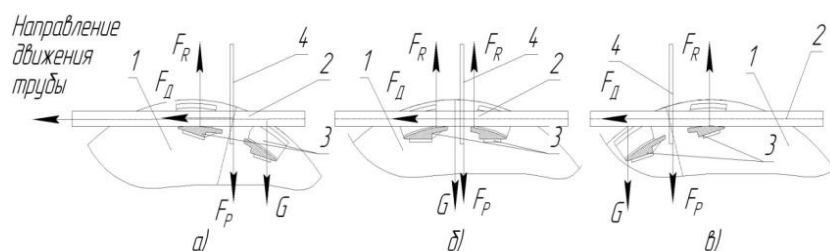


Рисунок 16 – схема позиционирования трубы

Здесь позиция 1 – направляющее колесо, 2 – труба, 3 – колодки, 4 – пильный диск; векторы: F_P – усилие резания, G – вес трубы, F_D – усилие от перемещения диска, F_R – реакция опоры трубы. Была рассмотрена задача определения векторов сил действующих на отрезаемый участок в конце резания с учетом теоретически полученных усилий. Изменения схемы и значений реактивных сил исходного поддерживающего устройства в процессе отделения коротких концевых участков стали причинами неуправляемой траектории их движения.

На основании этого была предложена симметричная схема позиционирования трубы (Рисунок 17) и конструкция устройства (Рисунок 18).

Процесс резания с колодками

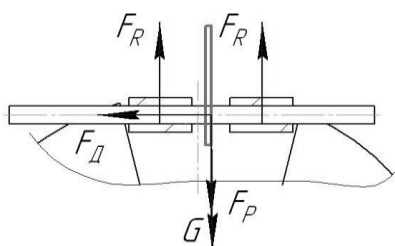


Рисунок 17 – Схема позиционирования трубы новым устройством

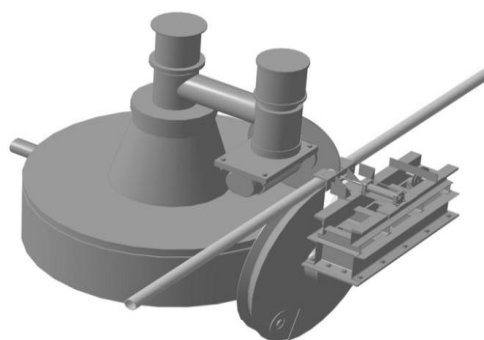


Рисунок 18 – Общий вид нового устройства

При подобной схеме фиксации трубы минимизируется радиальное смещение торцов отрезаемых участков трубы, это ведет к исключению аварийных ситуаций, повышению качества реза и исключает дополнительные операции подрезки на участке трубоотделки.

Второй причиной отказа предприятия от отделения дефектных коротких концевых участков трубы, выходящей из редуционного стана послужила неудачная конструкция сопровождающего, так называемого исчезающего рольганга (Рисунок 19), установленного в рабочем пространстве собственно пильной установки ЛПУ RHS1000–1. Основное назначение этого рольганга – ускоренное перемещение длинномерных труб после порезки на линию основной транспортной линии и быстрое его исчезновение при сбросе короткой немерной обреза. Опыт эксплуатации и расчеты показали, что подобная конструкция не способна обеспечить необходимого быстрого действия для безаварийной работы комплекса летучей пилы.

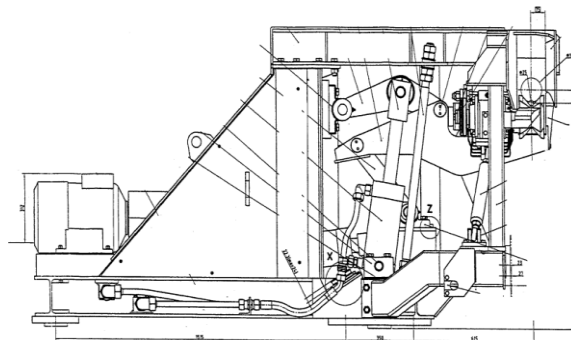


Рисунок 19 – Существующая конструкция исчезающего рольганга

На основании расчетов быстродействия комплекса была предложена новая конструкция рольганга (Рисунок 20).

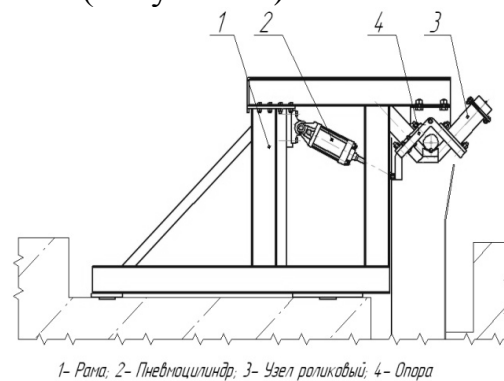


Рисунок 20 – Предложенная конструкция исчезающего рольганга

За счёт упрощения конструкции снижаются динамические нагрузки на раму и фундамент, увеличивается быстродействие смены рабочего состояния с порезки короткой обреза на пропускание длинномерных отрезков за счет раскрытия рольганга с помощью быстродействующего пневмоцилиндра, повышает ремонтпригодность рольганга. Ролики, смонтированные в наклонных плитах выполняют двойную функцию приводного рольганга и проводки, задавая чёткое направление движения удаляемой обреза.

Рольганги на выходе из пильной установки предназначены для ускоренного транспортирования мерных труб на линию холодильника и длинномерной обреза - в промежуточный бункер. В исходной конструкции в середине участка цилиндрического рольганга установлен поперечный сталкиватель длинной немерной обреза с пневматическим приводом. В процессе эксплуатации выявлена недостаточная надежность сбрасывания длинной обреза путем бокового сталкивания. После проведения расчетов быстродействия сталкивателя предложена конструкция выходных рольгангов лишенная указанных недостатков и предусматривающая концевой отражатель, исключающий случайное позиционирование отрезанного участка по отношению к силовому поперечному воздействию.

Результаты реконструкции защищены Патентами РФ .

Кроме того в главе описаны средства по борьбе с отклонениями от перпендикулярности торцев и представлены расчеты быстродействия модернизируемых устройств.

На основании определения энерго-силовых характеристик привода летучей пильной установки кареточного типа ТЭСА 102–377 разработаны номограммы, позволившие определить рациональные параметры натяжения приводного ремня, многократно повысить безотказность работы оборудования, снизить потери мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании исследования особенностей высокоскоростного процесса разделения подвижных труб на ходу на мерные участки с помощью летучих пильных установок непосредственно в технологических линиях трубных станов получены расчетные зависимости и математическая модель для определения изменяющихся во времени основных характеристик резания: глубины внедрения зуба в металл, подачи на зуб, мгновенного объема металла, удаляемого в пределах дуги резания. В результате установлено существенное влияние закона скорости подачи пильного диска и геометрических размеров сечения трубы на нестационарный характер изменения подачи на зуб в пределах цикла разрезания: от начала к концу цикла резания при постоянной скорости подачи пильного диска, характерной для ЛПУ кареточного типа, подача на зуб монотонно снижается до полутора раз, а при переменной скорости подачи (ЛПУ планетарного типа) - до 4 раз. Получен закон изменения мгновенного удаляемого объема металла (на дуге резания), который характеризуется двумя пиковыми значениями: в начале и конце цикла резания. Максимальные пиковые значения мгновенно удаляемого металла зависят от размеров сечения трубы и закона изменения подачи пильного диска и превышают показатели в период движения инструмента в полости трубы в 3-5 раз.

2. Применение методов, основанных на анализе пластического течения металла в области очага деформации при внедрении зуба в металл заготовки, позволило определить силовые воздействия на инструмент с учетом высокой скорости деформации, температурных условий процесса, геометрических параметров профиля зубьев, особенностей нестационарного изменения подачи на зуб и суммарной толщины снимаемого слоя, соответствующего количеству зубьев одновременно находящихся в контакте с заготовкой. Для быстроходной порезки поступательно перемещающейся трубной заготовки круглого сечения получена зависимость для определения окружных сил на рабочей поверхности зуба и полного сопротивления вращению инструмента. В результате получена нестационарная картина изменения нагрузки за период разрезания трубной заготовки с двумя пиковыми значениями, существенно (до пяти раз) превышающими значения суммарных сил резания в середине процесса. Установлена зависимость для закона изменения и пиковых значений суммарных сил резания от геометрических параметров сечения разрезаемой трубы, от скорости вращения пильного диска, среднего напряжения текучести и температуры разрезаемого материала (упрочнение или разупрочнение), от закона подачи режущего инструмента и геометрических характеристик его зуба. Показаны вероятные причины

образования дефектов в виде тонкостенного облоя, обусловленные состоянием пластической области в районе задней грани зуба.

3. Получены характеристики нагружения линии привода вращения пильного диска ЛПУ кареточного типа, содержащего ременную передачу. На основании полученных значений технологических нагрузок разработана обобщенная динамическая модель замещения приводного механизма пильного диска, позволившая установить закономерности изменения динамических нагрузок, воспринимаемых валом двигателя. Помимо традиционных характеристик расчетной модели: масс и жесткостей звеньев, диссипации и механической характеристики двигателя введены особенности и ограничения тяговой способности применяемой ременной передачи. Показатели изменения динамических нагрузок положены в основу рационального выбора характеристик настройки ЛПУ, направленных на повышение ее работоспособности.

4. Выполнен значительный объем экспериментальных натурных измерений энергосиловых показателей на ЛПУ кареточного типа в технологической линии трубоэлектросварочного стана для производства прямошовных труб диаметром до 426 мм. Сравнения энергетических балансов теоретического расчета и экспериментальных данных показали высокую точность характеристик, полученных расчетным путем на основании предложенной динамической модели.

5. На базе определения силовых и кинематических характеристик, полученных с использованием предложенных математических моделей, для ЛПУ планетарного типа (ЛПУ - RHS1000), установленной в технологической линии редуцированного стана ТПА 30-102, разработан и защищен патентами РФ комплекс технических предложений, направленных на повышение работоспособности и безотказности транспортной части оборудования и снижение расходного коэффициента при прокатке труб.

Для ЛПУ кареточного типа трубосварочного агрегата (ТЭСА 102–377) выполнена модернизация приводного механизма. На основании анализа полученной расчетной модели для определения энергосиловых показателей разработан номографический метод расчета и оборудование контроля натяжения ременной передачи, позволившие многократно увеличить безотказность работы пильной установки, избегая потерь мощности и нарушения кинематики резания из-за проскальзывания ремня.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:
Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Чечулин Ю. Б., Маслов В. С., Буйначев С. К. Определение параметров высокоскоростной порезки поступательно движущихся труб // Сталь. – 2012., № 9. С. 84–86.

2. Чечулин Ю. Б., Маслов В. С., Верт В. Ю., Трескин В. В. Модернизация узлов летучей пильной установки для безаварийной резки движущихся труб // Сталь. – 2012, № 10. С. 69–72.
3. Чечулин Ю. Б., Маслов В. С., Буйначев С. К.. Некоторые вопросы повышения надежности пильных установок при резке поступательно движущихся труб // Сталь. – 2013, № 5. С. 62–64

Публикации в других изданиях:

4. Маслов В. С., Чечулин Ю. Б. Исследование закона движения конца трубы, отрезаемого на летучей пильной установке // Сборник статей "Научные труды 17 Международной конференции молодых ученых", Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2009, С. 298–300.
5. Маслов В. С., Панфилов А. Ю., Чечулин Ю. Б. Модернизация системы поддержки труб при порезке на летучей пиле // Сборник статей "Научные труды 18 Международной конференции молодых ученых", Екатеринбург, УрФУ, 2010, С. 217–219.
6. Маслов В. С., Сидоров О. И., Чечулин Ю. Б. Модернизация летучей пилы ТПА 30–102 Первоуральского новотрубного завода / Сборник статей "Труды Международной научно-технической конференции "Трубы 2010", Челябинск, РосНИТИ, 2010, С. 226–230
7. Патент № 106854. Опорно-зажимное устройство / Федоров А. А., Чечулин Ю. Б., Трескин В. В., Маслов В. С., Верт В. Ю., Панфилов А. Ю. опубл. 27.07.2011 г.
8. Патент № 111038. Рольганг для транспортировки труб и удаления немерных отрезков / Чечулин Ю. Б., Трескин В. В., Маслов В. С., Верт В. Ю., Ильин А. Е. опубл. 10.12.2011 г.
9. Маслов В.С., Чечулин Ю.Б., Буйначев С.К. Определение энергосиловых параметров летучей пильной установки / «Труды 10-й Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии», Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2013, С. 368–372